

Алгоритм формирования радиолокационных изображений космических аппаратов со сверхразрешением на основе комплексирования спектрального оценивания и продолженной когерентной обработки

А. А. Казанцев¹, Д. А. Перов², А. А. Самородов¹, Б. А. Самородов¹

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

alexandraxandrkazantsev@gmail.com

² ПАО «Радиофизика», Москва, Россия

Аннотация. Представлен алгоритм формирования радиолокационных изображений (РЛИ) космических аппаратов (КА), основанный на комплексировании методов цифровой обработки когерентных широкополосных радиолокационных сигналов. Алгоритм позволяет повысить пространственное разрешение РЛИ КА как по продольной, так и по поперечной координате по сравнению с традиционной дальностно-доплеровской (ДД) обработкой. Приведены результаты экспериментальной отработки алгоритма.

Ключевые слова. Радиовидение, инверсный синтез апертуры, сверхразрешение, цифровая обработка сигналов, радиолокационный измерительный комплекс.

Super resolution algorithm for satellites inverse synthetic aperture radar imaging

Alexandr A. Kazantsev¹, Denis A. Perov², Alexey A. Samorodov¹, Boris A. Samorodov¹

¹ Mozhaisky space military academy, Saint-Petersburg, Russia

alexandraxandrkazantsev@gmail.com

² PAO "Radiofizika", Moscow, Russia

Abstract. The algorithm for inverse synthetic aperture radar imaging of satellites is presented. Proposed algorithm is based on different signal processing methods combination and allows to achieve better resolution both down and cross ranges in comparison with traditional Range-Doppler processing. In section 1 theoretical constraints related to traditional Range-Doppler processing are presented. In section 2 mathematical formulation of research problem are presented. Section 3 consists of detailed description of proposed algorithm. In section 4 experimental results given by use of anechoic chamber demonstrate quality of suggested algorithm. Section 5 summarizes conclusions by the subject of the article.

Keywords. Radar imaging, inverse synthetic aperture radar, super resolution, signal processing, anechoic chamber.

© Kazantsev A. A., Perov D. A., Samorodov A. A., Samorodov B. A., 2018

Введение

Интенсивное освоение космического пространства наряду с неуклонным снижением массогабаритных характеристик КА обуславливает необходимость совершенствования технических характеристик радиолокационных средств наблюдения, а также алгоритмов обработки измеряемой ими информации.

Применение когерентных широкополосных РЛС для обзора околоземного космического пространства позволяет получать РЛИ низкоорбитальных КА. Детальность РЛИ определяется количеством элементов разрешения, приходящихся на радиолокационный образ наблюдаемого КА по координатам продольной и поперечной дальности. При реализации в рассматриваемых РЛС режима инверсного синтезирования апертуры в сочетании с традиционной ДД-обработкой пространственное разрешение формируемых ими РЛИ определяется выражением (1), согласно которому размер элемента разрешения по продольной дальности обратно пропорционален ширине полосы частот F зондирующего импульса РЛС, а по поперечной — обратно пропорционален величине инверсно синтезируемой апертуры Ψ :

$$\Delta x = \frac{c}{2F}, \Delta y = \frac{\lambda_c}{2\Psi}, \quad (1)$$

где λ_c — средняя длина волны РЛС; c — скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве.

На сегодняшний день технически реализуемое значение F составляет порядка 10 % от центральной частоты $F \approx 0,1 f_c = 0,1c / \lambda_c$, а величина Ψ лимитирована условием внешней когерентности цели, характеризуемым миграцией локальных центров рассеяния (ЛЦР) по элементам разрешения РЛИ [1]:

$$\Delta y^2 > \frac{\lambda_c X_{\max}}{4}, \Delta x \Delta y > \frac{\lambda_c Y_{\max}}{4}, \quad (2)$$

где X_{\max} и Y_{\max} — максимальные габаритные размеры КА в продольном и поперечном направлениях соответственно. Приведенные выражения описывают принципиальные ограничения пространственного разрешения РЛИ, обусловленные как спецификой ДД-обработки, так и техническими характеристиками РЛС. Для их преодоления автора-

ми была поставлена задача по разработке алгоритма формирования РЛИ, основанного на комплексировании методов сверхразрешения и позволяющего синтезировать РЛИ с повышенным пространственным разрешением в сравнении с традиционной ДД-обработкой. При этом повышенное разрешение РЛИ по продольной координате реализуется путем применения методов спектрального оценивания (СО), а по поперечной — за счет реализации методов продолженной когерентной обработки (ПКО).

Постановка задачи

Этапу синтезирования РЛИ КА должен предшествовать ряд предварительных этапов сигнальной обработки: калибровка результатов когерентных широкополосных полнополяризационных измерений РЛХ КА; компенсация набегов фаз, обусловленных поступательным движением КА относительно РЛС; оценивание закона изменения ракурса наблюдения КА. Полагая, что предварительная обработка осуществлена, примем, что на вход алгоритма поступают результаты измерений частотно-ракурсной характеристики (ЧРХ) КА — зависимости комплексного коэффициента рассеяния (ККР) КА от частоты и ракурса локации при заданных поляризациях электромагнитного поля на передачу и прием $\hat{S}(f, \psi)$.

При локации КА в квазиоптической области рассеяния, когда максимальные продольный и поперечный габаритные размеры объекта существенно превышают среднюю длину волны РЛС $X_{\max} \gg \lambda_c$ и $Y_{\max} \gg \lambda_c$, отклик от КА представляет собой суперпозицию откликов от различных элементов конструкции (рис. 1) и его ЧРХ описывается выражением (3) [1].

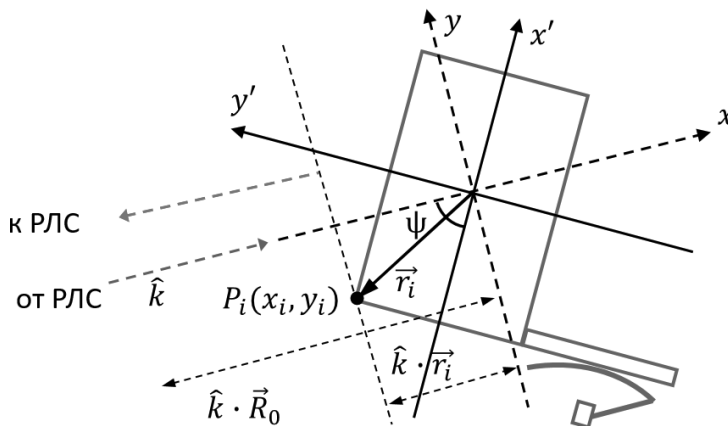


Рис. 1. Геометрия наблюдения при синтезировании РЛИ КА

Fig. 1. Observation geometry in inverse synthetic aperture radar imaging issue

$$\dot{S}(f, \psi) = \sum_{i=1}^Q \dot{S}_i(f, \psi) \exp(-j2k\vec{r}_i(\psi)), \quad (3)$$

где $\dot{S}_i(f, \psi)$ — ЧРХ i -го локального центра рассеяния (ЛЦР) с координатами x_i, y_i по радиальной и поперечной дальностям соответственно относительно фазового центра (ФЦ) РЛИ; Q — количество ЛЦР; k — волновое число. В выражении (3) произведение $2k\vec{r}_i(\psi)$ в показателе экспоненциального множителя характеризует положение ЛЦР на РЛИ для заданного ракурса локации ψ , а $\dot{S}_i(f, \psi)$ — амплитуду и форму функции рассеяния точки (ФРТ) соответствующего ЛЦР на РЛИ.

Раскрытие векторного произведения в показателе экспоненты позволяет представить выражение (3) в следующем виде:

$$\dot{S}(f, \psi) = \sum_{i=1}^P \dot{S}_i(f, \psi) \exp(-j2k(x_i \cos \psi + y_i \sin \psi)). \quad (4)$$

Тогда для функции РЛИ справедливо следующее выражение [2].

$$S(x, y) = \left| \frac{c}{2\pi} \int_{f_1}^{f_N} \int_{\psi_1}^{\psi_M} \sum_{i=1}^P \dot{S}_i(f, \psi) e^{j2k(x_i \cos \psi + y_i \sin \psi)} df d\psi \right|, \quad (5)$$

Выражение (5) может быть преобразовано к следующему виду:

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^P S_i(x, y) h_i(x - x_i, y - y_i), \quad (6)$$

где $S_i(x, y)$ — амплитуда плотности распределения ККР i -го ЛЦР по двумерному пространству продольная дальность — поперечная дальность, значение которой определяется габаритными размерами и материалом элемента конструкции КА X_{\max}, Y_{\max} , на котором происходит рассеяние; $h(x, y)$ — функция рассеяния точки (ФРТ), амплитуда которой прямо пропорциональна произведению ширины полосы зондирующего сигнала F на размер инверсно синтезируемой апертуры Ψ , а форма определяется частотно-ракурсным поведением i -го ЛЦР (например, для элемента конструкции КА сферической формы сечение ФРТ по координате дальности будет иметь функциональную зависимость типа $\text{sinc}(x)$, а для поверхности цилиндрической формы — $\text{sinc}^2(x)$).

Исходя из (6) РЛИ необходимо рассматривать как совокупность ЛЦР, обусловленных проявлением тех или иных механизмов рассеяния (МР), определяемых условиями локации, особенностями геометрической формы и материалами элементов конструкции КА (рис. 2).

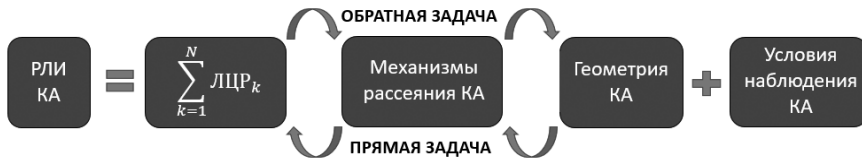


Рис. 2. Методический подход к формированию и интерпретации РЛИ

Fig. 2. Methodical approach to the formation and interpretation of radar images

В соответствии с характерными частотными, угловыми $\hat{S}_i(f, \psi)$ и поляризационными закономерностями рассеяния электромагнитного поля, возникающими на отдельных (локальных) элементах конструкции КА, выделяют следующую номенклатуру МР, проиллюстрированную на рис. 3, систематизированную и представленную в табл. 1 [3].

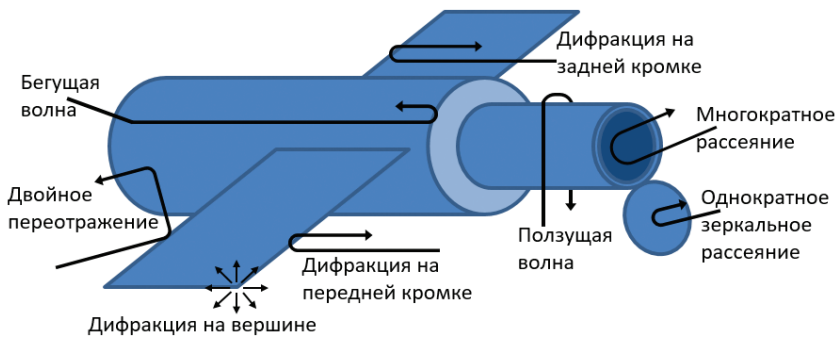


Рис. 3. Номенклатура МР КА типовой геометрической формы

Fig. 3. Scattering mechanisms of satellite with typical geometric shape

В общем случае каждому локальному элементу конструкции КА соответствует совокупность МР, однако, как правило, один из них доминирует над остальными, определяя частотные, угловые и поляризационные свойства указанного ЛЦР.

Применение методов СО и ПКО в целях формирования РЛИ со сверхразрешением сопряжено с наличием ошибок экстраполяции частотных характеристик (ЧХ) и интерполяции ЧРХ соответственно. Поэтому разрабатываемый алгоритм формирования РЛИ со сверхразрешением должен соответствовать задаваемым требованиям и иметь свои ограничения по применению, заключающиеся в нахождении компромисса между желаемой степенью повышения разрешения РЛИ и приемлемым уровнем ошибок амплитуд ЛЦР (независимо от того, какими МР они обусловлены).

Таблица 1

Квазиоптические МР КА типового геометрической формы

Тип МР	Однократное зеркальное рассеяние			Многократное зеркальное рас- сеяние		Дифракция		
Источник МР	Поверх- ность нулевой кривиз- ны	Поверх- ность еди- ничной кривизны	Поверхность двойной кри- vizны	Двукратное рассеяние	Троекратное рас- сеяние	Прямая кромка	Криволинейная кромка	Вершины
Геоме- трическая форма	Пла- стина с пло- щадью A	Цилиндр высотой l	Сфероид	Двухгран- ный угол	Трёхгранный уго- лок	Клин дли- ной l	Диск	Верши- на кону- са с углом раскры- ва θ
Параметры описания	Радиусы кривиз- ны ∞, ∞	Радиусы кривизны ∞, a	Радиусы кри- vizны a_1, a_2	Длина грани b	Длина грани b	Радиусы кривизны $0, \infty$	Радиусы кри- vizны $0, a$	Радиусы кривиз- ны $0, 0$
Элементы конструк- ции КА	ПСБ, корпуса КА	Корпуса КА цилиндри- ческой фор- мы, СЗБ	Калибровоч- ные КА, зер- кальные ан- тенны	Стыки кор- пуса КА и ПСБ	Двигательные установки, места сопряжения мо- дулей КА	Кромки корпусов КА, кром- ки ПСБ	Кромки зер- кальных ан- тенн, кромки СЗБ	Антен- ны кони- ческой формы
Част. зав-ть f^c	f^2	f^1	f^0	f^2	f^2	f^0	f^{-1}	f^{-2}
Макс. ЭПР	$4\pi A^2 / \lambda^2$	$ka l^2$	$\pi a a_2$	$8\pi b^4 / \lambda^2$	$12\pi b^4 / \lambda^2$	l^2 / π	$\lambda a / 2\pi$	$\lambda^2 (\theta / 4)^{4.3}$

Алгоритм

Предлагаемый алгоритм (рис. 4) основан на комплексировании различных методов цифровой обработки сигналов и содержит два ключевых этапа формирования РЛИ. Первый этап направлен на повышение разрешения РЛИ по радиальной дальности в соответствии с новым экстраполированным значением ширины полосы F' ЧХ КА. Второй этап заключается в повышении разрешения РЛИ по поперечной дальности в соответствии с увеличенным (продолженным) значением синтезируемой апертуры Ψ' за счет устранения эффекта миграции ЛЦР по элементам РЛИ и снятия ограничения (2).

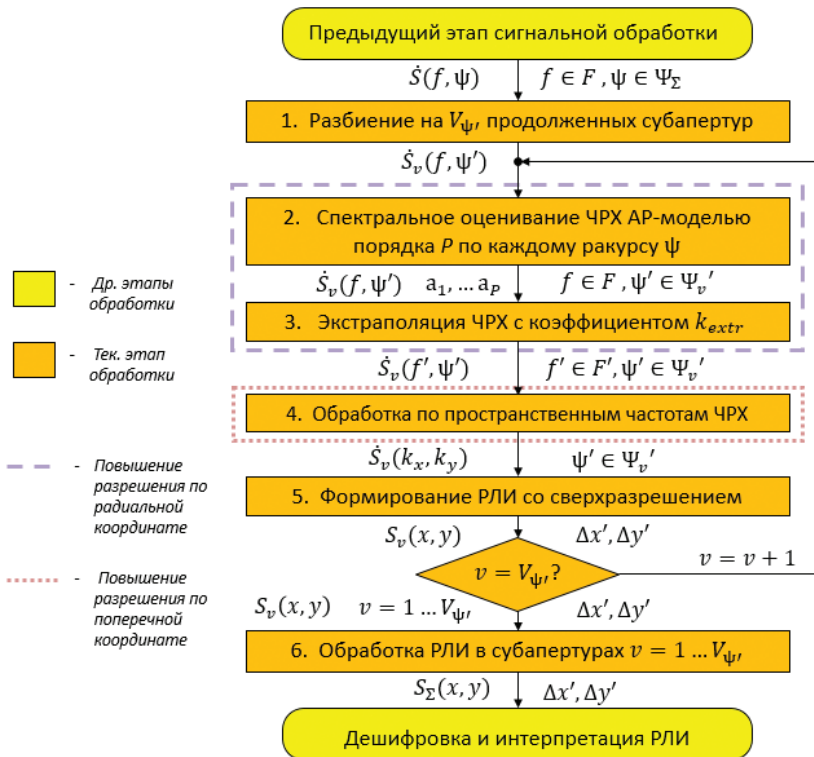


Рис. 4. Обобщенная блок-схема алгоритма формирования РЛИ со сверхразрешением

Fig. 4. Generalized block scheme of radar imaging formation with super resolution

На *шаге 1* вся имеющаяся апертура $\psi \in \Psi_\varepsilon$ разбивается на V_ψ парциальных продолженных апертур (субапертур), каждая из которых содержит M_ψ отсчетов $\psi_{mv} \in \Psi_v$, где $v = 1 \dots V_\psi$ — индекс парциальной продолженной апертуры, $m = 1 \dots M_\psi$ — индекс отсчетов ракурса в пределах парциальной продолженной апертуры. Субапертуры должны

иметь равные размеры, при которых $\Psi' = k_{\text{extend}} \Psi = \lambda_c F' / c = \lambda_c k_{\text{extr}} F / c$, где k_{extend} — коэффициент продолжения апертуры, а k_{extr} — коэффициент экстраполяции ЧХ, обеспечивающие формирование РЛИ КА с улучшенным поперечным разрешением, равным улучшенному радиальному $\Delta y' = \Delta x'$. Таким образом, все имеющиеся результаты измерений РЛХ на интервале когерентного накопления делятся на V_Ψ парциальных ЧРХ КА $\dot{S}_v(f_n, \psi_m')$, где $n=1 \dots N_F$ — индекс отсчетов частоты, а N_F — количество отсчетов частоты. Следует отметить, что для повышения эффективности дальнейшей цифровой обработки путем синтеза наиболее полных в смысле наличия информации о геометрической форме КА РЛИ на шаге 6 парциальные продолженные апертуры целесообразно выбирать с перекрытием. Однако эта особенность обуславливает дополнительные требования к вычислительным ресурсам. Далее на шагах 2–5 выполняется идентичная для каждой субапертуры цифровая обработка.

На шаге 2 для каждого ракурса проводится СО импульсной характеристики (ИХ) объекта $\dot{S}(t)$ авторегрессионным параметрическим методом Берга [4]. Суть данного метода заключается в том, что ИХ $\dot{S}(t)$ сопоставляется параметрическая модель $\dot{S}_p(t)$ порядка P , которая наиболее соответствует результатам измерений ЧХ $\dot{S}(f_n)$ в смысле минимума суммы квадратов ошибок линейного предсказания ЧХ вперед и назад. При этом ИХ рассматривается как передаточная характеристика объекта наблюдения. Z-преобразование $\dot{S}_p(t)$ имеет вид:

$$\dot{S}_p(z) = \frac{b_0}{A(z)} = b_0 / \left(1 - \sum_{i=0}^Q a_i z^{-i} \right), \quad (7)$$

где a_i — параметры авторегрессионной модели; b_0 — мощность шума.

В общем случае получение аналитической оценки модели ЧХ при помощи найденных параметров авторегрессионной модели a_i не является корректным в связи с отсутствием априорной информации о количестве ЛЦР объекта, проявляющихся при заданном ракурсе наблюдения ψ_m' . Однако при априорно известном числе ЛЦР объекта Q , когда порядок P соответствует их количеству ($P = Q$), при помощи указанной модели может быть получена достоверная параметрическая оценка ЧХ объекта в следующем виде:

$$\dot{S}_p(f_n) = \sum_{i=1}^P a_i p_i^n, \quad (8)$$

где p_i — полюса $\dot{S}_p(z)$.

Сопоставляемая достоверная модель $\dot{S}_p(f_n)$ позволяет оценить геометрическую форму объекта наблюдения. В общем случае Q для каж-

ного ракурса ψ_m' является неизвестным, и для его оценивания применяются широко распространенные информационные критерии, такие как AIC или MDL [5, 6]. Однако их использование для КА как для объекта сложной формы представляется затруднительным. По этой причине оценивание ЧХ в расширенной полосе частот $\dot{S}(f_n')$, $f_n' \in F'$, выполняется посредством экстраполяции на основе имеющихся результатов измерений $\dot{S}(f_n)$, $f_n \in F$, и результатов оценивания параметров авторегрессионной модели a_i порядка P , в общем случае отличного от числа МР, проявляющихся для заданного ракурса $P \neq Q$. Для надежного оценивания параметров модели a_i ее порядок обычно выбирается согласно правилу $P = N_F / 3$ [7].

Достоинством метода СО Бёрга является устойчивость к низким значениям отношения сигнал/шум (ОСШ) [8], а ключевым недостатком — игнорирование частотных зависимостей амплитуд ЛЦР $f^{\alpha_i} = f^0$ (см. табл. 1), приводящее к ошибкам их спектрального оценивания и проявляющееся в ошибках экстраполяции на шаге 1.

На *шаге 3* алгоритма проводится экстраполяция измеренной ЧХ за пределы полосы измерений $f \rightarrow f'$ в соответствии с заданным значением коэффициента экстраполяции $k_{extr} = F' / F$. Экстраполированные значения отсчетов ЧХ определяются при помощи найденных параметров авторегрессионной модели a_i как линейная комбинация предыдущих (рис. 5).

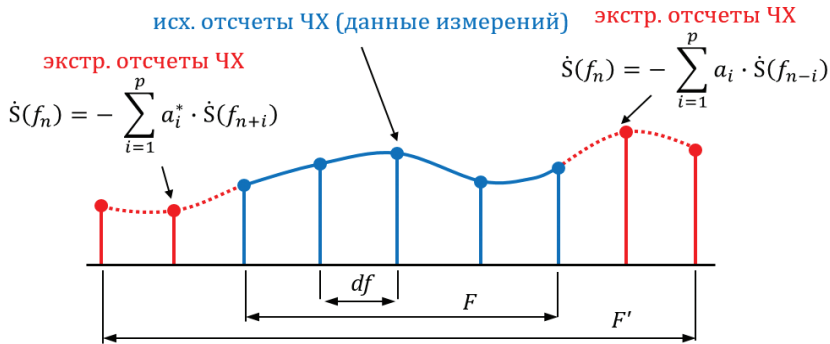


Рис. 5. Экстраполяция ЧХ КА за пределы полосы измерений

Fig. 5. Bandwidth extrapolation technique

Для оценивания качества экстраполяции был сформирован набор тестовых элементарных радиолокационных отражателей простой формы (пластина, цилиндр, конус, сфера и т.д.) и рассчитана библиотека их РЛХ, что позволило охватить всю номенклатуру МР, присущую КА типовой геометрической формы (см. рис. 3 и табл. 1).

На рис. 6 справа показан пример повышения разрешения по дальности для тестового объекта вида сфера — конус — конус, слева показаны МР, характерные для данного объекта при носовом (нулевом) ракурсе локации. Из рисунка видно, что за счет экстраполяции ЧХ на дальностном портрете (ДП) $S_{\text{экстр}}(x)$ (синяя кривая) разрешаются МР, которые до этого не разрешались на $S_{\text{исх}}(x)$ (черная кривая). Из сравнения эталонного ДП $S_{\text{эталон}}(x)$ (зеленая кривая) и $S_{\text{экстр}}(x)$ видно, что для всех МР ошибки амплитуд ЛЦР незначительны.

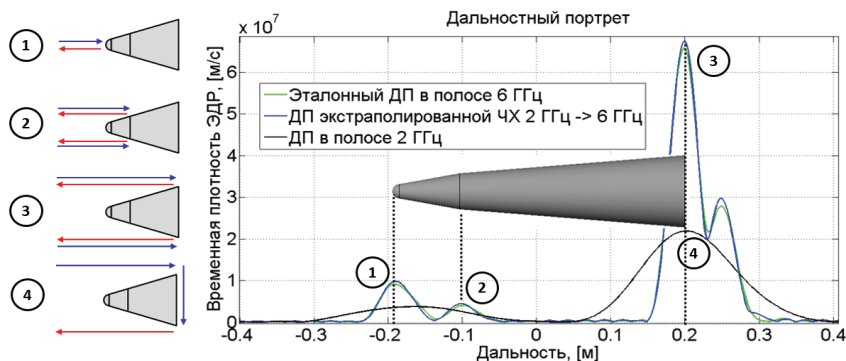


Рис. 6. Дальностные портреты тестового объекта вида сфера — конус — конус

Fig. 6. Sphere-cone-cone test object's range profiles

Использование библиотеки РЛХ объектов простой формы позволило установить, что при локальном для МРОСШ $q = 20$ дБ и $k_{\text{extr}} = 3$ ошибки амплитуд ЛЦР на одномерных дальностных портретах $S(x)$ не превышают 10 % от своего номинального значения для всей номенклатуры МР, в том числе и поверхностно-волновых (ползущая, бегущая волны).

На шаге 4 алгоритма для каждой парциальной экстраполированной ЧРХ КА $\dot{S}_v(f_n', \psi_m')$ применяется полярная обработка (ПО) [1, 2], относящаяся к одному из методов ПКО и устраняющая миграцию ЛЦР по элементам разрешения. Сущность ПО заключается в интерполяции ЧРХ $\dot{S}_v(f_n', \psi_m')$, сформированных в координатах частота — ракурс, к характеристикам рассеяния объекта, заданных в координатах компонент пространственной частоты $\dot{S}_v(k_x, k_y)$ (рис. 7).

Указанный переход $\dot{S}_v(f_n', \psi_m') \rightarrow \dot{S}_i(k_x, k_y)$ может быть выполнен посредством различных алгоритмов интерполяции: линейной, кубической, сплайн-интерполяции и др., выбираемых в зависимости от соотношения требуемой оперативности вычислений и качест-

ва результата. К недостаткам любого из перечисленных алгоритмов интерполяции следует отнести шумы, приводящие к снижению локального ОСШ для ЛЦР.

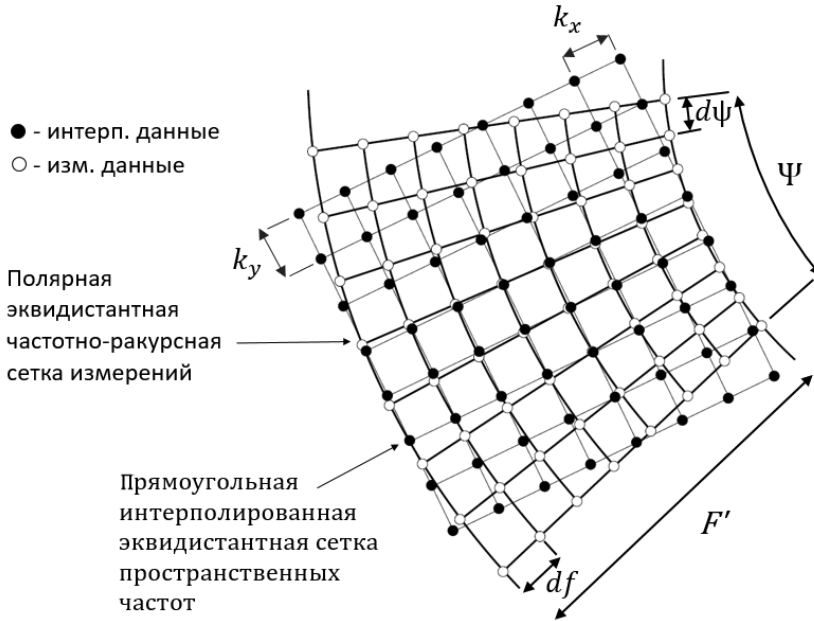


Рис. 7. Полярная обработка

Fig. 7. Polar formatting

В [9] проведена сравнительная оценка эффективности применения различных алгоритмов ПКО по отношению к формированию РЛИ посредством численного интегрирования (ЧИ) выражения (5) с использованием модельных РЛХ миры, состоящей из пяти равноудаленных точечных ЛЦР с одинаковыми постоянными единичными амплитудами $\dot{S}_v(f_n', \psi_m') = 1$. На рис. 8 в логарифмическом масштабе показаны РЛИ указанной миры, нормированные к уровню 0 дБ, полученные с использованием различных методов обработки.

Видно, что на РЛИ (а), сформированном посредством традиционной ДД-обработки, возникает миграция ЛЦР по элементам РЛИ, приводящая к искажению их амплитуд. В наибольшей степени искажаются амплитуды наиболее удаленных от ФЦ РЛИ отражателей. РЛИ (б), полученное посредством ПО, соответствует эталонному РЛИ (в), сформированному путем ЧИ выражения (5). Меньший контраст РЛИ (б) по отношению к РЛИ (в) обусловлен возрастанием уровня фона РЛИ вследствие появления шумов интерполяции.

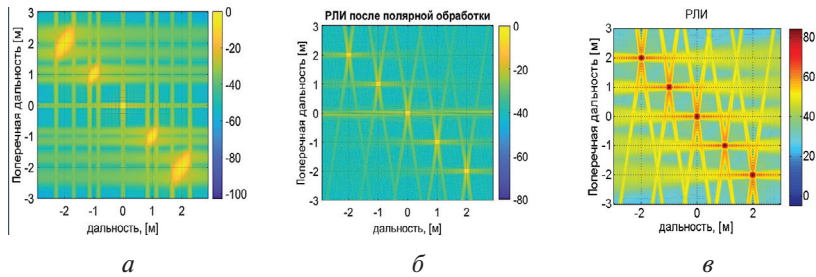


Рис. 8. РЛИ миры, полученное с помощью: *а* — ДД-обработки, *б* — ПО, *в* — ЧИ

Fig. 8. Test object's radar images formed by different algorithm types: *a* — Range-Doppler; *б* — polar formatting; *в* — numerical integration

На рис. 9 представлена зависимость относительной амплитуды ЛЦР от его радиальной удаленности от ФЦ РЛИ при применении различных алгоритмов ПО в условиях отсутствия избыточности количества отсчетов ЧРХ $\dot{S}_v(f_n', \psi_m')$.

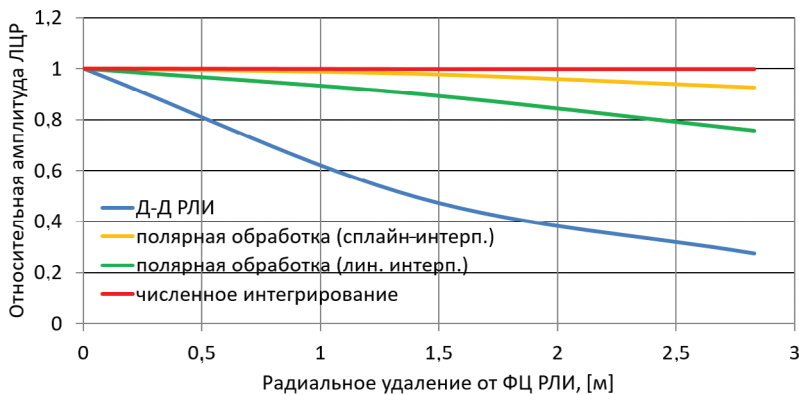


Рис. 9. Зависимость относительной амплитуды ЛЦР от его радиальной удаленности от ФЦ РЛИ для различных алгоритмов ПО

Fig. 9. Scatterers amplitude error dependency from radial distance for various algorithms types

Представленные зависимости свидетельствуют о том, что при удалении ЛЦР на 3 м от ФЦ РЛИ ошибки амплитуд ЛЦР при кубической сплайн-интерполяции не будут превышать 10 % при ОСШ $q = 20$ дБ. В случае избыточности количества отсчетов ЧРХ ошибки интерполяции для обоих случаев снижаются, при этом ошибки линейной интерполяции будут стремиться к ошибкам сплайн-интерполяции.

Данный шаг алгоритма позволяет синтезировать апертуру большего размера $\Psi \rightarrow \Psi'$, устраняя эффект миграции ЛЦР по элементам

РЛИ, т.е. выбирать новое значение размера апертуры Ψ' исходя из требования получения РЛИ КА с поперечным разрешением, равным радиальному $\Delta y' = \Delta x'$.

Далее, на *шаге 5* выполняется непосредственно синтезирование двумерных парциальных РЛИ КА со сверхразрешением по обеим координатам по сравнению с традиционной ДД-обработкой $\dot{S}_i(x, y)$ посредством обращения $\dot{S}_i(k_x, k_y)$ оператором двумерного обратного быстрого преобразования Фурье вдоль компонент пространственной частоты, что существенно сокращает время, необходимое для синтеза РЛИ по сравнению с ЧИ выражения (5). Применение алгоритма быстрого преобразования Фурье стало возможным за счет реализации ПО на предыдущем шаге алгоритма.

На *шаге 6* алгоритма, заключительном, применяется еще один метод ПКО — метод субапертур [10], сущность которого заключается в следующем. Конечное РЛИ формируется путем суммирования парциальных РЛИ, повернутых на угол, соответствующий разнице между значением центрального ракурса для опорной субапертуры и значением центрального ракурса для v -й субапертуры $\Delta\psi_{0v} = \psi_{0оп} - \psi_{0v}$ (рис. 10). На рис. 10 в качестве опорного выбрано значение $\psi_{0оп} = \psi_{01}$.

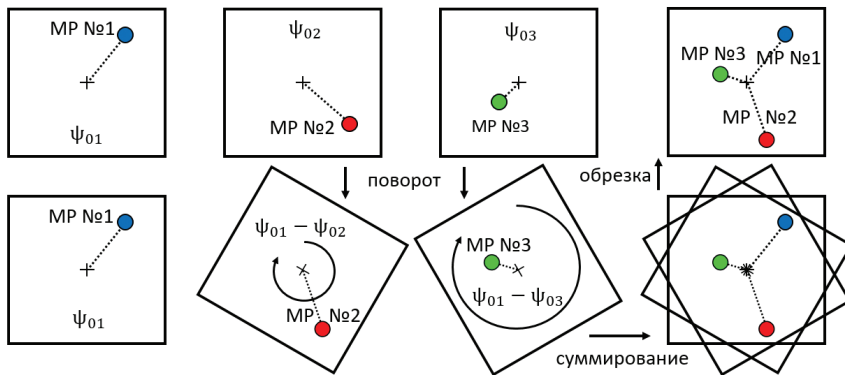


Рис. 10. Метод субапертур
Fig. 10. Sub-apertures processing

Целью данного шага является формирование конечного РЛИ, на котором проявляется большее количество различных МР КА, доминирующих в общем случае при разных значениях угла наблюдения ψ . При этом складываемые парциальные РЛИ необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечивалось приблизительное равенство локальных ОСШ для различных МР после выполнения суммирования. В противном случае МР, доминирующий сразу в нескольких субапер-

турах, когерентно просуммировавшись несколько раз, приведет к ухудшению радиометрического разрешения РЛИ в силу увеличения динамического диапазона при одном и том же количестве уровней его квантования. Так же следует действовать и при формировании РЛИ на основе комплексирования данных измерений различных поляризационных компонент ПМ ЧРХ.

В результате применения метода субапертур на заключительном шаге алгоритма конечное РЛИ будет наиболее полным в смысле наличия информации о геометрической форме КА (взаимном расположении, конфигурации и размерах элементов конструкции КА), что повысит возможности по его интерпретации.

Экспериментальная отработка алгоритма

Экспериментальная отработка предложенного алгоритма проводилась на базе сертифицированного радиолокационного измерительного комплекса «Цунами-3» ВКА им. А. Ф. Можайского. Основными элементами РИК «Цунами-3» являются: безэховая экранированная камера (БЭК); антенный коллиматор; опорно-поворотное устройство (ОПУ) и измерительное оборудование. Схема электродинамического эксперимента представлена на рис. 11.

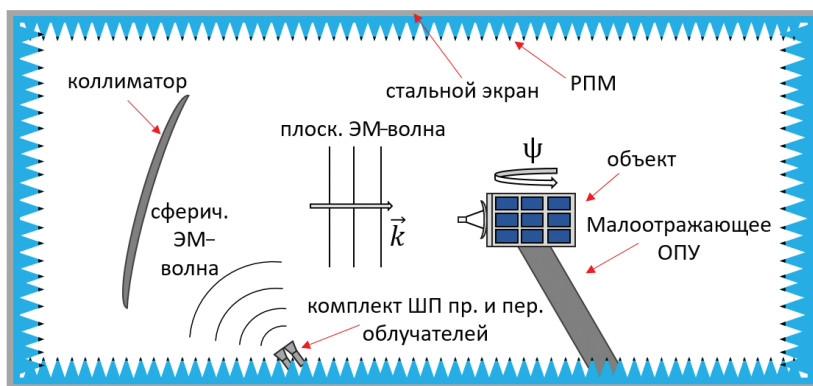


Рис. 11. Схема проведения эксперимента в БЭК

Fig. 11. Scheme of experiment in anechoic chamber

В качестве тестового объекта был выбран КА дистанционного зондирования Земли SkySat-2, для которого была изготовлена полномасштабная электродинамическая модель. Внешний вид КА и размещение его модели на ОПУ в БЭК показаны на рис. 12.

Для отработки алгоритма были проведены измерения РЛХ модели КА в полосе частот $F = 8-12$ ГГц и секторе ракурсов $-45 < \psi < 45$ в линейном ортогональном поляризационном базисе (VV, VH, HV,

НН). Ракурсу наблюдения $\psi = 0$ соответствовало направление, нормальное к плоскости объектива КА. Далее рассмотрена только НН-компонента ПМ ЧРХ.

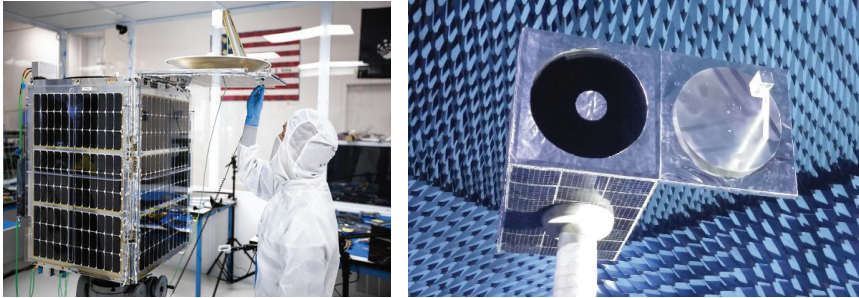


Рис. 12. КА SkySat-2 (слева) и его модель на ОПУ в БЭК (справа)

Fig. 12. SkySat-2 (left) and full-size scale model on turntable in anechoic chamber (right)

По данным измерений было сформировано $V_\psi = 37$ исходных ЧРХ с шагом $d\psi_0$ по значению центрального ракурса субапертуры, равно-го $2,5^\circ$. В качестве опорной была выбрана ЧРХ для $\psi_0 = 0$ в усеченной полосе частот 1,3 ГГц (9,35–10,65 ГГц) и усеченной апертуре 0,13 рад. ($-0,075-0,075$ рад.).

Первоначально для каждой исходной ЧРХ была сформирована ЧРХ в полосе частот $F = 9,35-10,65$ ГГц и продолженной апертуре $\psi' = 0,39$ рад. Далее в соответствии с первым и вторым шагами алгоритма каждая сформированная ЧРХ была спектрально оценена и экстраполирована вниз и вверх по частоте при $k_{\text{extr}} = 3$, что соответствовало полосе частот $F' = 8,05 < f' < 11,95$ ГГц.

Экстраполированная опорная ЧРХ представлена рис. 13, б. На рис. 13, г показана эталонная (измеренная в полосе 8,05–11,95 ГГц) ЧРХ, соответствующая экстраполированной опорной. Сравнение добавленных поверх ЧРХ пунктирных линий на рис. 13, б, г показывает проявление ошибок экстраполяции, что является следствием игнорирования частотных зависимостей ЛЦР.

В соответствии с третьим шагом разработанного алгоритма каждая экстраполированная ЧРХ была интерполирована к сетке компонент пространственной частоты $S_v(f', \psi') \rightarrow S_v(k_x, k_y)$ (рис. 13, в). Далее по интерполированным характеристикам были сформированы 37 парциальных РЛИ модели КА.

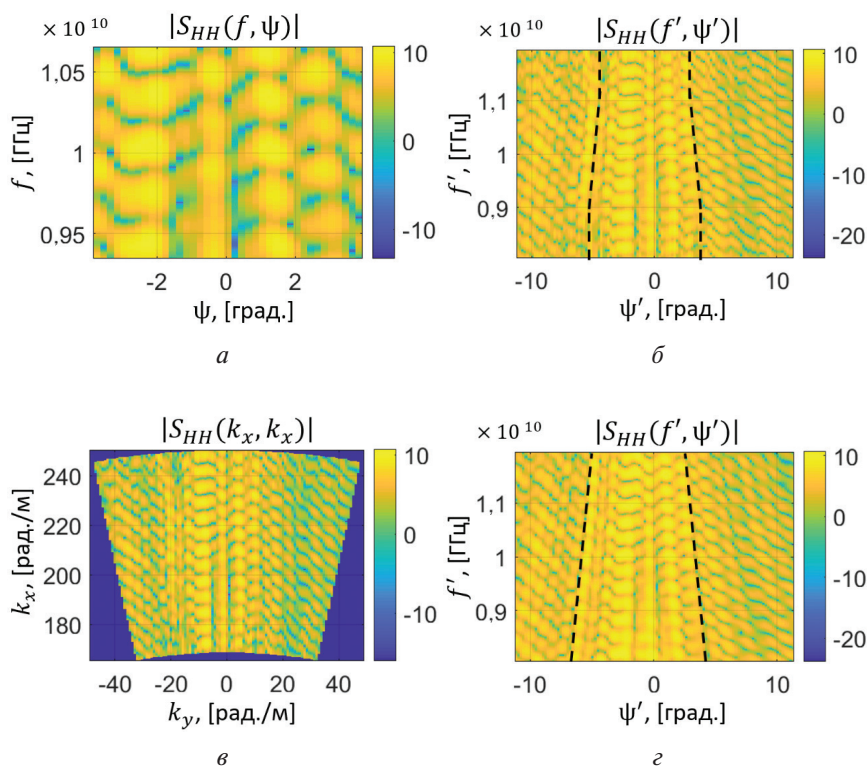


Рис. 13. РЛХ модели SkySat-2

Fig. 13. Backscattering radar characteristics of SkySat-2 model

РЛИ для опорной ЧРХ представлены на рис. 14: *а* — полученное посредством ДД-обработки по исходной ЧРХ, приведенной на рис. 13, *а*; *б* — полученное посредством ДД обработки по экстраполированной в расширенном диапазоне ракурсов наблюдения ЧРХ, приведенной на рис. 13, *б*; *в* — полученное посредством разработанного алгоритма по данным характеристики, приведенной на рис. 13, *в*; *г* — полученное посредством численного интегрирования эталонной ЧРХ, представленной на рис. 13, *г*. Таким образом, РЛИ на рис. 14 расположены в порядке улучшения качества.

Из рис. 14 видно, что РЛИ (*в*), сформированное посредством предложенного алгоритма, в наибольшей степени соответствует эталонному РЛИ (*г*), позволяя достаточно точно оценить форму, продольный и поперечный размеры основных элементов конструкции КА, в отличие от РЛИ (*а*), полученного посредством традиционной ДД-обработки.

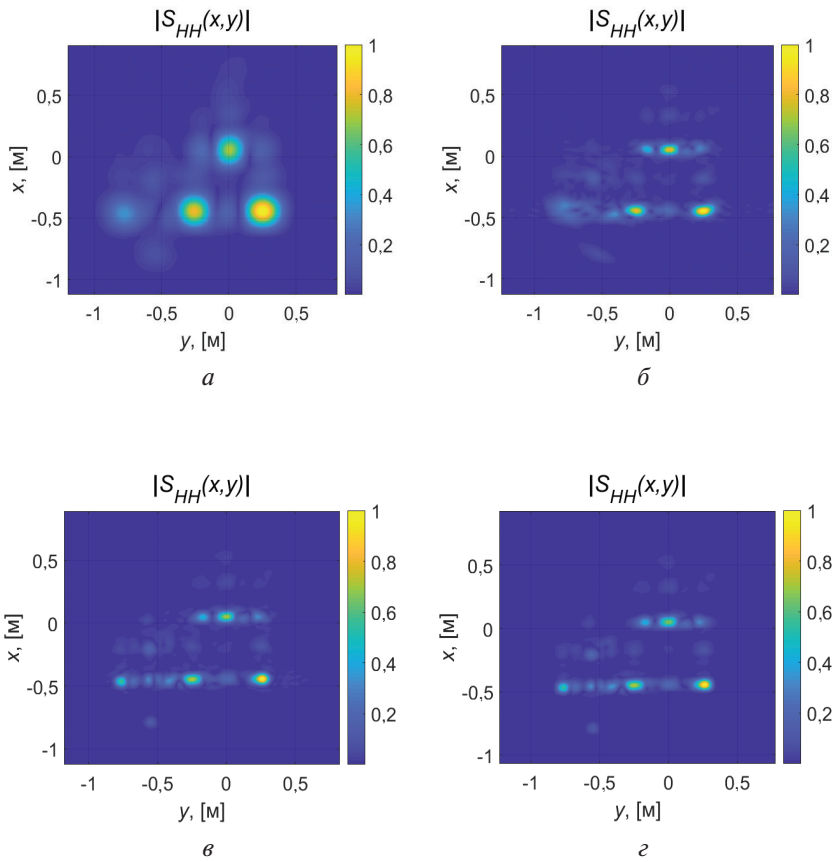


Рис. 14. РЛИ электродинамической модели КА SkySat-2

Fig. 14. SkySat-2 full size scale model radar images

РЛИ на рис. 14, б демонстрирует необходимость применения полярной обработки после экстраполяции ЧХ, так как по нему нельзя достоверно оценить размеры тех или иных элементов конструкции КА в силу наличия эффекта миграции ЛЦР. Согласно выражению (2) для КА больших размеров указанный эффект будет проявляться сильнее, следовательно, возрастает необходимость комплексирования методов сверхразрешения.

На заключительном шаге алгоритма из парциальных РЛИ, синтезированных на основе комплексирования методов сверхразрешения в соответствии с шагами 2–5 алгоритма, было сформировано суммарное конечное РЛИ на основе применения метода субапертур (рис. 15).

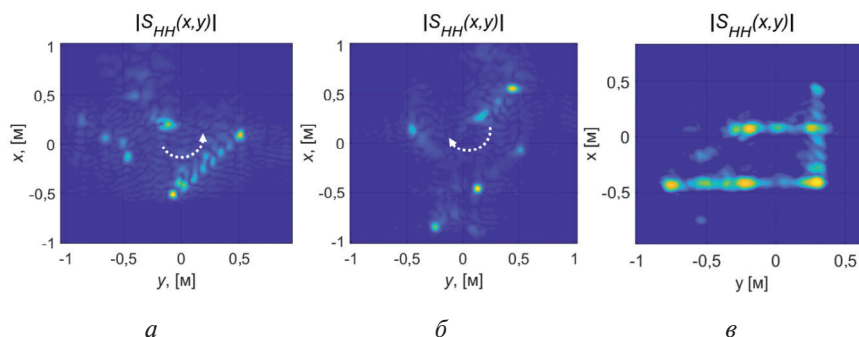


Рис. 15. Применение метода субапертур для макета KA SkySat-2

Fig.15. Realization of sub-aperture's method for SkySat-2 full-scale model

На рис. 15, *а*, *б* показаны парциальные РЛИ, синтезированные в субапертурах для значений $\psi_0 = -45^\circ$ и $\psi_0 = +45^\circ$ соответственно. Парциальное опорное РЛИ представлено выше на рис. 14, *в*. На рис. 15, *в* представлено конечное РЛИ, полученное посредством применения метода субапертур. Из рис. 15, *в* видно, что ЛЦР, обусловленные МР, связанными с геометрической формой КА, складываются когерентно, в то время как фантомные ЛЦР, а также боковые лепестки ЛЦР — нет.

Заключение

Предложенный алгоритм ориентирован на реализацию в перспективных широкополосных РЛС радиовидения с инверсным синтезированием апертуры и позволяет существенно повысить их информационные возможности по наблюдению КА. Так, при достаточно высоком значении ОСШ $q > 20$ дБ может быть достигнуто трехкратное улучшение разрешения по обеим координатам РЛИ, при этом ошибки амплитуд ЛЦР на РЛИ не будут превышать уровня 20 % от своих истинных значений вне зависимости от типа соответствующего им МР.

Ключевым преимуществом предлагаемого алгоритма является его устойчивость к шуму. Некорректный учет в алгоритме частотной зависимости амплитуд ЛЦР в общем случае несущественно отражается на дешифровочных свойствах РЛИ, определяемых в основном их детальностью.

Апробация алгоритма с использованием результатов полунатурного физического моделирования подтверждает его возможности по улучшению разрешения формируемого РЛИ при обработке ЧРХ малоразмерного КА, измеренных в ограниченной полосе частот. Для КА больших электрических размеров достоверность получаемых посредством разработанного алгоритма результатов будет возрастать.

Возможным путем совершенствования предложенного алгоритма является использование методов спектрального оценивания, позволяющих учесть частотную зависимость амплитуд ЛРЦ КА.

Литература/References

1. Ausherman D., Kozma A., Walker J., Jones H., Poggio E. Developments in radar imaging. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, vol. 20, no. 4, pp. 363–400.
2. Ozdemir C. *Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB*. Wiley series in microwave and optical engineering. New Jersey, 2012.
3. Knott E., Shaeffer J., Tuley M. *Radar Cross Section*. Second Edition. SciTech Publishing, Raleigh, 2004.
4. Burg J. P. *Maximum Entropy Spectral Analysis*. PhD thesis. Stanford University, 1975.
5. Aikake H. A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on automatic control*, 1974, vol. AC-19, no. 6, pp. 716–723.
6. Rissanen J. Modeling By Shortest Data Description. *Automatica*, 1978, vol. 14, pp. 465–471.
7. Moore T., Zuerndorfer B., Burt C. Enhanced Imagery Using Spectral-Estimation-Based Techniques. *Lincoln laboratory journal*, 1997, vol. 10, no. 2, pp. 171–186.
8. Stoica P., Moses R. *Spectral Analysis of Signals*. Pearson Education, 2005. 512 p.
9. Казанцев А., Самородов А., Самородов Б. Сравнительный анализ методов продолженной когерентной обработки при синтезировании радиолокационных изображений космических объектов // Сборник докладов XXII Международной конференции «Радиолокация, навигация, связь». 2016. С. 1178–1190.
10. Kazantsev A., Samorodov A., Samorodov B. Sravnitel'nyj analiz metodov prodolzhennoj kogerentnoj obrabotki pri sintezirovanii radiolokacionnyh izobrazhenij kosmicheskikh ob'ektov [Different kind of extended coherent processing methods comparative estimation in inverse synthetic aperture radar application]. *Sbornik dokladov XXII Mezhdunarodnoj konferencii Radiolokacija navigacija svyaz'* [Collection of reports XXII International conference Radar Navigation Communication]. 2016, pp. 1178–1190. (In Russian)
10. Borison S., Bowling S., Cuomo K. Super-Resolution Methods for Wideband Radar. *The Lincoln laboratory journal*, 1992, vol. 5, no. 3, pp. 441–461.

Сведения об авторах

Казанцев Александр Александрович — начальник лаборатории, старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Перов Денис Алексеевич — начальник сектора ПАО «Радиофизика», perovda@ya.ru, г. Москва.

Самородов Алексей Аркадьевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, superelex1964@inbox.ru, г. Санкт-Петербург.

Самородов Борис Аркадьевич — старший научный сотрудник лаборатории Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

Information about the authors

Alexandr A. Kazantsev — head of laboratory, senior researcher, Mozhaysky Space-military academy, r. Saint-Petersburg.

Denis A. Perov, head of sector, PAO «Radiophysics», perovda@ya.ru, Moscow.

Alexey A. Samorodov, Candidate of technical science, senior researcher of department, Mozhaysky Space-military academy, superelex1964@inbox.ru, Saint-Petersburg.

Boris A. Samorodov, senior researcher of laboratory, Mozhaysky Space-military academy, Saint-Petersburg.

Поступила / Received: 17.06.2018

Принята в печать / Accepted: 18.07.2018